Национальный Исследовательский Ядерный Университет

Московский инженерно-физический институт

Кафедра № 40 «физики элементарных частиц»

Реферат по теме:

«Теневой мир с одним (вторым) поколением фермионов»

Студент: Каменщиков А.А.

Группа: Т10-40

Москва, 2011 г.

***Теневой мир с одним поколением фермионов.***

Основными наблюдательными данными, на которые опирается космология, являются данные о реликтовом излучении, о химическом составе вещества, о крупномасштабной структуре Вселенной. Каждый из видов данных позволяет исходя из космологических представлений предсказать физические явления в соответствую­щую эпоху. Особое значение для нас имеют данные о химическом составе Вселенной, так как их удается связать с условиями в ранней Вселенной с помощью известной физики (ядер и частиц), позволяя, тем самым, ограничить возможные выходы за ее рамки.

В рамках данного реферата произведено исследование гипотезы, суть которой – предположение о том, что в современной Вселенной кроме обычного мира, в котором присутствуют три поколения фермионов, есть ещё и теневой мир с одним поколением фермионов. Притом эти два мира взаимодействуют между собой только гравитационно. Полагая, что такая гипотеза справедлива, интересно оценить космологические эффекты, в частности химический состав Вселенной на разных стадиях её развития, вытекающий из такого предположения. Такая оценка поможет проверить уровень достоверности гипотезы и, возможно, скорректировать (модифицировать) её.

***Стабильное теневое вещество.***

Для определённости будем работать в предположении, что значения масс фермионов теневого мира, а, соответственно, и их соотношения, совпадают с соответствующими массами и отношениями фермионов в «обычном» (наблюдаемом нами) мире в рамках второго поколения, а именно:

$$\tilde{m}\_{μ}=m\_{μ}=105 МэВ$$

$$\tilde{m}\_{S}=m\_{S}=500 МэВ$$

$$\tilde{m}\_{C}=m\_{C}=1.27 ГэВ$$

Далее тильдой будем обозначать частицы и параметры частиц теневого мира. Вследствие отсутствия смешивания теневых и обычных состояний мюоны теневого мира стабильны. Кроме того, будем полагать, что в теневом мире присутствуют $\tilde{W}^{\pm }$ и $\tilde{Z}^{0}$ бозоны, свои безмассовые фотоны $\left(\tilde{γ}\right)$ и глюоны ($\tilde{g}$):

$$\tilde{m}\_{W}=m\_{W}=80 МэВ$$

$$\tilde{m}\_{Z}=m\_{Z}=92 МэВ$$

Присутствуют в теневом мире и нейтрино ν, массы которых по аналогии с обычным миром относительно малы:

$$\tilde{m}\_{ν}=m\_{ν}\rightarrow 0 МэВ$$

Кроме того, будем иметь в виду, что в рассматриваемой модели отсутствуют механизмы инфляции и бариосинтеза. Поэтому при анализе космологической эволюции начальные условия расширения, существование горячей стадии ранней Вселенной и величина барионной асимметрии Вселенной постулируются. Положим, что концентрация барионов в теневом мире такая же, как и в обычном мире. Единственное поколение кварков теневого мира аналогично второму поколению кварков обычного мира, то есть там присутствует $\tilde{S}$ и $\tilde{C}$ кварк. Главная их особенность состоит в том, что в теневом мире $\tilde{S}$ кварк является стабильным кварком, а $\tilde{C}$ распадается по каналу:

$\tilde{C}\rightarrow \tilde{S}+\tilde{μ}^{+}+\tilde{ν}\_{μ}$

(33)

через $\tilde{W}^{\pm }$ бозон. Тогда в теневом мире материю будут образовывать только $\tilde{S}$ кварки ($\tilde{C}$ кварки распадутся по вышеуказанному каналу в силу того, что обладаютдостаточно большой массой).

Механизм образования избыточных лептонов и кварков теневого мира считаем таким же, как и для обычного мира. Тогда для теневого мира подобно обычному на каждый мюон приходится по одному S ̃ и $\tilde{C}$ кварку каждого цвета. С учётом распада $\tilde{C}$ кварка каждому мюону будет соответствовать 6 $\tilde{S}$ кварков и 2 антимюона (в обычном мире каждому электрону соответствует u и d кварки каждого цвета).

Поскольку в рассматриваемом нами теневом мире единственный стабильный кварк – это $\tilde{S}$ кварк, то наиболее вероятный кандидат на роль стабильного бариона – это $\tilde{Ω}$барион ($\tilde{S}\tilde{S}\tilde{S}$), являющийся аналогом Ω частицы обычного мира. Барионом его назовём в силу того, что он же является и первым кандидатом на роль элемента, формирующего ядерную материю теневого мира. Элементарный атом в теневом мире: ($\tilde{S}\tilde{S}\tilde{S}$)- + $\overbar{μ}$+ атом, который далее будем называть **DMA** (**D**ark **M**atter **A**tom).

Оценим энергию связи внутри атома DMA, полагая, что её значение пропорционально энергии связи атома водорода H с учётом соотношения масс электрона и мюона (в обычном мире энергия связи атома водорода порядка 10 eV):

$$E\_{con}^{e/m}\~10 eV×\frac{M\_{μ}}{M\_{e}}=2 KeV$$

*Ядерные реакции.*

Рассмотрение ядерных реакций теневого мира при отличается от аналогичного рассмотрения для обычного мира, поскольку в теневом мире отсутствуют аналоги переносчиков межядерного взаимодействия – пионов. По этой причине, если предположить, что в теневом мире всё же присутствуют ядерные реакции, то стоит сделать предположение о переносчиках ядерных взаимодействий. В качестве таких переносчиков можно рассматривать глюоны, а также теоретические частицы, состоящие из глюонов – глюболы. Современные оценки масс глюболов следующие:

$$M\_{G}\left(0^{++}\right)=1549\pm 53 MeV$$

$$M\_{G}\left(2^{++}\right)=2310\pm 110 MeV$$

$$M\_{G}\left(1^{+-}\right)=2332\pm 264 MeV$$

Существенная разница в таких двух подходах (рассмотрение через глюоны и глюболы) заключается в следующем: глюоны – безмассовые частицы, взаимодействующие с цветовым зарядом, а глюболы – массивные и взаимодействуют с бесцветным состоянием.

***Космологические свойства теневого мира.***

Оценим возможность атомных столкновений в теневом мире. Для этого сравним время свободного пробега атома в теневом мире с временем жизни вселенной. Воспользуемся следующими оценками:

t = 1 / (n\*v\*σ)

где n – средняя концентрация барионов в теневом мире (в рассматриваемой модели она постулировалась равной средней концентрации барионов в обычном мире, то есть 1 см-3 для галактики и 10-7 см-3 для вселенной), σ – поперечное сечение частицы (σ = 10-16 см2 \* (me / mμ)2 = 10-16 / 40000 = 0.25\*10-20 см2), v – скорость движения частицы в галактике (v = 200\*105 см/c). Время жизни вселенной 1017 с. Тогда

tg = 1 / (1\*0.25\*10-20\* 200\*105) = 2\*1013 с << 1017 с (для галактики),

tu = 1 / (10-7\*0.25\*10-20\* 200\*105) = 2\*1020 с >> 1017 с (для вселенной).

Из этих оценок видно, что атомный газ является столкновительным в масштабах галактик, и нестолкновительным - в масштабах вселенной.

Будем считать, что вплоть до распада инфлатона плотность энергии обычного мира и плотность энергии теневого мира одинаковы. Положим также, что термодинамическое равновесие между обычным и теневым миром было нарушено сразу после инфляции, впоследствии чего переходы из обычной материи в теневую отсутствуют. Оценим далее соотношение температур теневого и обычного мира $\frac{\tilde{T}}{T}$. Для этого воспользуемся законом сохранения энтропии для обычного и теневого мира по отдельности, а, соответственно, и для суммы энтропии теневого и обычного мира.

(30а)

S0 = S0\*a03= S1\* a13 = S1

(30б)

S = κs\*T3

$$κ\_{S}=2+\sum\_{i}^{}\frac{g\_{s}}{2}+\frac{7}{8}×\sum\_{k}^{}\frac{g\_{s}}{2}+\sum\_{\tilde{i}}^{}(\frac{\tilde{g}\_{s}}{2}×\left(\frac{\tilde{T}}{T}\right)^{3})+\frac{7}{8}×\sum\_{\tilde{k}}^{}\left(\frac{\tilde{g}\_{s}}{2}×\left(\frac{\tilde{T}}{T}\right)^{3}\right)$$

(30д)

Здесь S0 – энтропия во время инфляции, S1 – энтропия современного мира, *gS* – число спиновых состояний, $i и \tilde{i}$ – индексы суммирования по бозонам обычного и теневого мира, а $k и \tilde{k}$ - индексы суммирования по фермионам обычного и теневого мира. Тогда, исходя из закона сохранения энтропий для теневого и обычного мира, имеем:

(31а)

St0 + SW+,W-,Z0 + Sb0 + Sc0 + Ss0 + Sτ0 + Sd0 + Su0 + Sμ0 + S∑0 = S∑1 (для обычного мира)

(23)

(24)

$\tilde{S}\_{c}^{0}+\tilde{S}\_{s}^{0}+\tilde{S}\_{μ}^{0}+\tilde{S}\_{W^{+},W^{-},Z}^{0}+\tilde{S}\_{∑}^{0}=\tilde{S}\_{∑}^{1}$ (для теневого мира)

В этих выражениях S0 – вклады энтропий соответствующих компонент (помеченных индексами) для теневого и обычного мира в начальный момент, S1 – аналогичные вклады в конечный момент. Таким образом, имеем:

$(\frac{7}{8}×6×3×2×2+3×3+\frac{7}{8}×2×2×2+2×κ\_{ост})×T\_{0}^{3}×a\_{0}^{3}= 2×κ\_{ост}×T\_{1}^{3}×a\_{1}^{3}$

(25)

$(\frac{7}{8}×2×3×2×2+3×3+\frac{7}{8}×2×2+2×\tilde{κ}\_{ост})×\tilde{T}\_{0}^{3}×\tilde{a}\_{0}^{3}= 2×\tilde{κ}\_{ост}×\tilde{T}\_{1}^{3}×\tilde{a}\_{1}^{3}$

Первое выражение для обычного мира, второе (где параметры помечены тильдой) – для теневого мира. Параметр $κ\_{ост}$ - вклад в энтропию тех компонентов, которые продолжают вносить его и в конечный момент времени. Первое слагаемое в обоих выражениях – вклад всех кварков с антикварками, имеющими по 3 цвета и 2 спиновых состояния, второе слагаемое в 25 и 30 – вклад W и Z бозонов, третье – вклад лептонов второго и третьего поколения. Для оставшихся вкладов имеем:

(26)

$2×κ\_{ост}=2+\frac{7}{8}×3×2+\frac{7}{8}×2×2$

(27)

$2×\tilde{κ}\_{ост}=2+\frac{7}{8}×2$

(28)

В обычном мире (27) играют роль фотоны, нейтрино (три поколения) и антинейтрино с одним спиновым состоянием и электроны с позитронами, имеющие по 2 спиновых состояния. В теневом мире (28) играют роль только фотоны и один (единственный) сорт нейтрино:

$\frac{\tilde{T}\_{1}^{3}}{T\_{1}^{3}}×\frac{\tilde{κ}\_{ост}}{κ\_{ост}}=\frac{\frac{7}{8}×2×3×2×2+3×3+\frac{7}{8}×2×2+2×\tilde{κ}\_{ост}}{\frac{7}{8}×6×3×2×2+3×3+\frac{7}{8}×2×2×2+2×κ\_{ост}}$

(29а)

$\frac{\tilde{T}\_{1}^{3}}{T\_{1}^{3}}=\frac{\frac{7}{8}×2×3×2×2+3×3+\frac{7}{8}×2×2+2×\tilde{κ}\_{ост}}{\frac{7}{8}×6×3×2×2+3×3+\frac{7}{8}×2×2×2+2×κ\_{ост}}×\frac{κ\_{ост}}{\tilde{κ}\_{ост}}$

(29б)

$\frac{\tilde{T}\_{1}^{3}}{T\_{1}^{3}}=\frac{\frac{7}{8}×2×3×2×2+3×3+\frac{7}{8}×2×2+2+\frac{7}{8}×2}{\frac{7}{8}×6×3×2×2+3×3+\frac{7}{8}×2×2×2+2+\frac{7}{8}×3×2+\frac{7}{8}×2×2}×\frac{2+\frac{7}{8}×3×2+\frac{7}{8}×2×2}{2+\frac{7}{8}×2}$

(29в)

$\frac{\tilde{T}\_{1}^{3}}{T\_{1}^{3}}=1.190$

(29г)

$\frac{\tilde{T}\_{1}}{T\_{1}}=1.060$

(29д)

Проверим далее насколько возможна реализация данной модели во Вселенной.

Космологический нуклеосинтез и его следствия для случая присутствия теневого мира с одним поколением фермионов.

Рассмотрим химический состав нашего (обычного) мира в условиях присутствия теневого мира с оговорёнными выше свойствами. Ключевым параметром для количественной оценки химического состава:

$$κ\_{ε}=2+\sum\_{i}^{}\frac{g\_{s}}{2}+\frac{7}{8}×\sum\_{k}^{}\frac{g\_{s}}{2}+\sum\_{\tilde{i}}^{}(\frac{\tilde{g}\_{s}}{2}×\left(\frac{\tilde{T}}{T}\right)^{4})+\frac{7}{8}×\sum\_{\tilde{k}}^{}(\frac{\tilde{g}\_{s}}{2}×\left(\frac{\tilde{T}}{T}\right)^{4})$$

где *gS* – число спиновых состояний, $i и \tilde{i}$ – индексы суммирования по бозонам обычного и теневого мира, а $k и \tilde{k}$ - индексы суммирования по фермионам обычного и теневого мира.

В таком случае:

$κ^{'}\_{ε\*}\left(T\~1 MeV\right)=2+\frac{7}{8}×\left(2×\frac{2}{2}+3×2×\frac{1}{2}+1×2×\frac{1}{2}\*(\frac{\tilde{T}\_{1}}{T\_{1}})^{4}\right)=7.478$

(30)

Для удобства результаты будем нормировать на случай N =3 (точная оценка которого содержит ряд деталей, вынесенных за рамки данного изложения), наделяя все величины, характерные для нашего случая, штрихом «'»:



(20)

Важно подчеркнуть, что вклад в $κ\_{ε}$’ вносят любые частицы, включая любые неизвестные, которые даже не взаимодействуют (кроме как гравитационно) с обычными частицами.

$\left(\frac{n}{p}\right)’ = \left(\frac{1}{7}\right)^{\left(\frac{43}{8×7.478}\right)^{\frac{1}{6}}}=0,159$

(31)

Подставляя полученное значение $\left(\frac{n}{p}\right)’$ в выражение для удельной доли гелия, получим:

$Y\_{p}’ = \frac{2×0,159}{1+0,159}≈0.274$

(32)

Обратимся к результатам экспериментальных оценок удельной доли гелия для того, чтобы понять, насколько полученное нами значение (32) соответствует наблюдаемым данным:



Рис. 1. *Относительные содержания первичных химических элементов в зависимости от количества барионов. Толщины линий отражают точность предсказаний. Прямоугольниками показаны области значений в пределах статистических (внутренний) и систематических (внешний) ошибок, полученные из наблюдений. Вертикальные полосы показывают области значений* $η\_{B}$*, допустимых из анализа первичного нуклеосинтеза (BBN) и реликтового излучения (CMB). Индекс «р» означает первичный (primordial)*

Сопоставим полученную нами оценку относительной доли гелия (32) и наблюдаемые значения этой величины с учётом её погрешности (рис. 1). Кроме того, с целью лучше понять, насколько предложенная нами модель соответствует наблюдаемым данным, построим зависимость Yp’ от соотношения Ti/T:



Рисунок 2. Зависимость относительной доли гелия (Yp’) от разницы температур обычного и теневого мира Ti/T.

По рисункам 1 и 2 можно заметить, что Yp’ не противоречит экспериментальным данным (то есть, не выходит за пределы 0,27) только в том случае, если $T\_{i}/T\leq $1. То есть, тогда, когда температура теневого мира не выше температуры обычного мира. Предельно возможный случай ($\frac{T\_{i}}{T}=$1) даёт такие следствия:

$κ\_{ε}\left(T\~1 MeV\right)=2+\frac{7}{8}×\left(2×\frac{2}{2}+4×2×\frac{1}{2}\right)=7,250$

(19а)

$\left(\frac{n}{p}\right)’ = \left(\frac{1}{7}\right)^{\left(\frac{43}{8×7.250}\right)^{\frac{1}{6}}}=0,157$

(19б)

$Y\_{p}’ = \frac{2×0.157}{1+0.157}≈0.271$

(19в)

Выражение 19в для Yp является предельно допустимым (рис. 1) с точки зрения наблюдаемых данных. Сравнивая это значение ($Y\_{p}’=0.271)$ и полученное нами ранее значение 32 ($Y\_{p}’=0.274)$, видно, что наша модель находится в предельной точке, однако в явное противоречие с экспериментальными данными не вступает.

***Теневая материя.***

Сравнивая энергии частиц с температурой TRD→MD $\~$ 1эВ, можно увидеть, что материя теневого мира неоднородна:

* она имеет горячую нерелятивистскую составляющую – нерелятивистские нейтрино,
* релятивистскую составляющую – релятивистские нейтрино и фотоны
* холодную - мюоны.

Оценим плотность теневой материи при введённых изначально характеристиках нашей модели, а именно массе теневого S кварка

$$\tilde{m}\_{S}=m\_{S}=500 МэВ$$

$$ω\_{d}=\frac{\tilde{m}\_{s}×3+\tilde{m}\_{μ}}{3×m\_{u/d}}×ω\_{o}=\frac{500×3+100}{900}×4\%=7\%$$

где $\tilde{m}\_{s}$ - масса $\tilde{S}$ кварка теневого мира, $\tilde{m}\_{μ}$ – масса мюона теневого мира, $m\_{u/d}$ масса u/d кварков обычного мира, $ω\_{o}$ - плотность материи обычного мира. Таким образом, расчёт показывает, что плотность теневой материи в нашем случае 7%. Учитывая, что известное значение плотности теневого мира 22%, видно, что наша модель не способна объяснить всю скрытую массу вселенной.

Тогда поскольку наш и теневой мир асимметричны по построению, то будем полагать асимметрию и в значениях масс S и $\tilde{S}$кварков. Такой способ модификации модели поможет подобрать значение массы $\tilde{S}$, которое объяснит всю плотность скрытой массы за счёт теневого мира:

$M\_{\tilde{S}}$ = 22/4\*300 = 1650 МэВ/с2

(34)

Массу $M\_{\tilde{C}}$ изменим так, чтобы возможность распада по мюонному каналу была обеспечена, к примеру:

(35)

$M\_{\tilde{C}}$ = 2000 МэВ/с2

В таком случае $\tilde{C}$ кварк теневого мира по прежнему будет распадаться и все описанные ранее эффекты останутся справедливыми.

Элементарный атом в теневом мире: ($\tilde{S}\tilde{S}\tilde{S}$)- + μ+ атом (**DMA)**. Из вышесказанного вытекает оценка массы ядра ($\tilde{S}\tilde{S}\tilde{S}$) и массы атома DMA:

$$M\_{\tilde{S}\tilde{S}\tilde{S}}=4950\frac{МэВ}{с^{2}}$$

$$M\_{DMA}=5100\frac{МэВ}{с^{2}}$$

Иной способ решить проблему скрытой массы – сохранить симметрию значений масс кварков теневого и обычного мира, но изменить величину барионной асимметрии теневого мира соответствующим образом:

$$(\tilde{m}\_{s}×3+\tilde{m}\_{μ})×\tilde{n}×\frac{1}{ω\_{d}}=(3×m\_{u/d})×n×\frac{1}{ω\_{o}}$$

$$\frac{\tilde{n}}{n}=\frac{ω\_{d}}{ω\_{o}}×\frac{3×m\_{u/d}}{(\tilde{m}\_{s}×3+\tilde{m}\_{μ})}$$

$$\frac{\tilde{n}}{n}=\frac{22}{4}×\frac{3×300}{(500×3+100)}≈3.09$$

Таким образом, можно сохранить симметрию значений масс кварков обычного и теневого мира, но работать в предположении, что плотность барионов теневого мира в 3.09 раз больше плотности барионов обычного мира. При этом, такое значение не меняет выводов относительно космологических свойств теневого мира.

Произведем далее оценку типа скрытой массы на основании полученных нами параметров модели теневого мира. Температура скрытой матреии на момент рекомбинации

$$T\~\frac{E\_{con}}{10}=200 eV$$

где Econ – энергия связи DMA, T – температура на момент рекомбинации. Масштабный фактор:

$$a\~T^{-1}\~t^{\frac{2}{3}}$$

$$(\frac{T\_{tod}}{T\_{rec}})^{-1}=(\frac{t\_{tod}}{t\_{rec}})^{\frac{2}{3}}$$

Где a – масштабный фактор, Ttod – температура теневого мира сегодня, Trec – температура теневого мира на момент рекомбинации, ttod – время жизни вселенной на сегодня, trec – время жизни вселенной на момент рекомбинации. Откуда

$$t\_{rec}=(\frac{T\_{tod}}{T\_{rec}})^{3/2}×t\_{tod}=(\frac{3 K}{11600×200})^{3/2}×13×10^{9} years=19 years$$

Оценим характерный размер структуры в теневом мире, пересчитав длину пробега атомов на момент рекомбинации с учётом масштабных факторов.

$$R=λ\_{rec}×\left(\frac{a\_{tod}}{a\_{rec}}\right)=(\frac{T\_{tod}}{T\_{rec}})^{3/2}×t\_{tod}×\left(\frac{T\_{rec}}{T\_{tod}}\right)×v\_{rec}=(\frac{T\_{tod}}{T\_{rec}})^{1/2}×t\_{tod}×\sqrt{\frac{3×k×T}{M\_{DMA}}}=(\frac{3 K}{11600×200})^{1/2}×13×10^{9} years×\sqrt{\frac{3×8.617×10^{-5}×200}{5100×10^{6}}}×\frac{1}{3.26}=1555.3 pc$$

$$v\_{rec}=\sqrt{\frac{3×8.617×10^{-5}×200}{5100×10^{6}}}=0.00034$$

Где R – размер структуры теневого мира сегодня, λrec – длина пробега атомов теневого мира на момент рекомбинации, atod – масштабный фактор сегодня, arec – масштабный фактор на момент рекомбинации, vrec - скорость движения атомов на момент рекомбинации. В результате получаем характерный размер структуры в теневом мире 1555 парсек, то есть порядка килопарсека. Учитывая, что размер галактики сегодня имеет порядок 100 килопарсек, можно сказать, что материя теневого мира тёплая.

**Заключение.**

Таким образом, рассматривая изначальную модель, предусматривающую наличие теневого мира с одним вторым поколением фермионов с массами, симметричными массам фермионов обычного мира, мы пришли к выводу, что такая модель не противоречит данным (оценки химического состава вселенной), но не может объяснить всю скрытую массу.

В изменённой модели фермионы теневого мира - аналоги второго поколения «обычного» мира со стабильным мюоном, стабильным $\tilde{S}$ кварком и нестабильным Cd кварком имеют следующие массы:

$M\_{\tilde{S}}$ = 1650 МэВ/с2

$M\_{\tilde{C}}$ = 2000 МэВ/с2

Такая модификация даёт объяснение скрытой массе вселенной и делает такую модель возможной и интересной для дальнейших исследований.

Кроме того, предложен другой способ модификации модели, при котором сохраняется симметрия значений масс кварков теневого и обычного мира, но сделано предположение о разной барионной асимметрии, а именно:

$$\frac{\tilde{n}}{n}=3.09$$

Также оценены возможные формы материи теневого мира, построены предположения о работе различных механизмов взаимодействия в теневом мире и протекании ядерных реакций.

Таким образом, нами получена модель, которая не противоречит закономерностям нуклеосинтеза и наблюдаемым экспериментальным данным, способная объяснить массу тёмной материи.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.**

1. Анисович В. «Легчайший скалярный глюбол». – Успехи физических наук, обзор актуальных проблем, том 168, №5.
2. Бронников К.А., Рубин С.Г. Лекции по гравитации и космологии. – М.: МИФИ, 2008.
3. Емельянов В.М. Стандартная модель и её расширения.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
4. Емельянов В.М., Белоцкий К.М. Лекции по основам электрослабой модели в новой физике. – М.: МИФИ, 2007.
5. Кузьменко Д.С., Симонов Ю.А., Шевченко В.И. «Вакуум, конфайнмент и струны КХД в методе вакуумных корреляторов» – Успехи физических наук, обзор актуальных проблем, том 174, №1.
6. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. Изд. 4-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2008.
7. Перкинс Д. Введение в физику высоких энергий. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Попов С.Б., Прохоров М.Е. «Популяционный синтез в астрофизике» – Успехи физических наук, обзор актуальных проблем, том 177, №11.
9. Потехин А.Ю. «Физика нейтронных звёзд» – Успехи физических наук, обзор актуальных проблем, том 180, №12.
10. Рубин С.Г. Устройство нашей Вселенной. – Фрязино: Век 2, 2006.
11. Фортов В.Е. «Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе» – Устный выпуск журнала «успехи физических наук», том 179, №6.
12. Хлопов М.Ю. Основы космомикрофизики. – М.: Едиториал УРСС, 2004.